



Etude des phénomènes thermiques associés à la fabrication directe de pièces en TA6V par projection laser

Julie Maisonneuve, Christophe Colin, Yves Bienvenu, Pascal Aubry

► To cite this version:

Julie Maisonneuve, Christophe Colin, Yves Bienvenu, Pascal Aubry. Etude des phénomènes thermiques associés à la fabrication directe de pièces en TA6V par projection laser. Matériaux 2006, 2006, Dijon, France. 12 p. hal-00144488

HAL Id: hal-00144488

<https://hal.science/hal-00144488>

Submitted on 3 May 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude des phénomènes thermiques associés à la fabrication directe de pièces en TA6V par projection laser

Julie Maisonneuve^a, Christophe Colin^a, Yves Bienvenu^a, Pascal Aubry^b

^a julie.maisonneuve@ensmp.fr, christophe.colin@ensmp.fr, yves.bienvenu@ensmp.fr, Centre des Matériaux, Ecole des Mines de Paris, Paristech, CNRS UMR 7633 BP 87, 91003 Evry Cedex, France.

^b paubry@clfa.fr, GIP-Gérailp, 16 bis avenue Prieur de la Côte d'Or, Arcueil 94114 Cedex, France.

RESUME:

Direct metal deposition is an additive manufacturing process that enables to build up a component layer-by-layer by the laser melting of a metal powder on a solid substrate, using a coaxial nozzle and a powder delivery head.

The heating and cooling that occur in direct laser metal deposition can generate particular thermal conditions which are responsible of the specific microstructure and grain growth and lead to specific build features in term of mechanical properties.

In the present work, an experimental study concerning laser-powder interaction, process instrumentation and metallurgical properties of the built parts is exposed. Then, a thermal balance has been established from thermal data of Ti-6Al-4V.

MOTS-CLES : laser, Direct laser deposition (DLD), Ti-6Al-4V, laser-powder interaction, thermal balance.

Introduction

Ce travail est mené dans le cadre du projet PROFIL réalisé en partenariat avec Snecma, Dassault Aviation, EADS-CCR, Eurocopter, MBDA, Phénix Systems, le Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris et le GIP-Gérailp d'Arcueil. Le projet PROFIL concerne le développement de deux nouvelles technologies de fabrication rapide et directe de pièces « bonne matière », avionnables, sans outillage, près des cotes (« near net shape ») afin de les amener du stade expérimental actuel vers un stade pré-industriel. L'objectif clairement annoncé de ce projet est de diminuer les coûts de 50% et les délais de fabrication de 70% par rapport aux techniques conventionnelles (forge, fonderie, usinage). Ces deux technologies, la projection et le frittage laser, permettent de générer des pièces 3D par couches successives à partir de données CAO. Hormis une grande rapidité de fabrication, ces deux procédés offrent des propriétés mécaniques comparables à celles d'un matériau massif obtenu par une filière d'élaboration classique ainsi qu'une excellente densité (>98%) sans post-traitement de densification. Cependant, les pièces fabriquées présentent une forte rugosité (au mieux un Ra de 20µm et un Rt de 100µm) ainsi qu'une oxydation superficielle relativement importante. De plus, la précision géométrique ainsi que les contraintes résiduelles engendrées au sein des pièces après refroidissement et les déformations générées après traitements thermiques sont pour l'instant encore mal maîtrisées. L'objectif du projet est de fabriquer des démonstrateurs en bonne matière à l'échelle 1 qui témoignent de la faisabilité et de l'intérêt de ces deux procédés. Dans un premier temps, les matériaux mis en oeuvre sont le TA6V et l'Inconel 718, deux des matériaux les plus représentatifs de la partie moteur d'un avion civil. Puis dans un second temps, d'autres matériaux métalliques et non métalliques seront étudiés (alliages d'aluminium, aciers, céramiques, matériaux à gradient de composition, . . .).

La projection laser, procédé dérivé du rechargement laser, permet d'élaborer des pièces denses, près des cotes, sans outillage et sans reprise d'usinage à partir d'une poudre métallique. Cette technique est plutôt adaptée à la construction de pièces à géométrie simple, de moyennes à grandes dimensions (environ un mètre). Le faisceau laser continu Nd:YAG crée un bain fondu à la surface d'un substrat et la poudre métallique est projetée dans ce bain via un gaz porteur (hélium) au travers d'une buse coaxiale. Un gaz de protection (hélium) est injecté au niveau de la buse afin de limiter l'oxydation de la pièce construite. Le substrat fixé sur une table se déplace dans le plan XY afin de générer la pièce couche par couche à partir

des données de son fichier CAO. La buse fixée à un portique se déplace en Z, permettant la génération des couches successives.

Expérimentation

Le procédé de projection comporte un certain nombre de paramètres d'entrée qui influent sur des paramètres de sortie relatifs aux caractéristiques de la pièce projetée. Les paramètres d'entrée sont subdivisés en trois catégories :

- Les paramètres laser : Il s'agit d'une part de paramètres du 1^{er} ordre tel que la puissance (P), la vitesse de balayage (V) et le débit massique de poudre (Dm). Les paramètres du second ordre concernent la configuration de travail (figure1) : la défocalisation laser et la défocalisation poudre qui sont respectivement la distance entre le point focal laser ou le point focal poudre et la surface de travail ainsi que la distance de travail qui est la distance entre la sortie de la buse et la surface de travail. Le type de buse, la nature et le débit du gaz porteur de la poudre et du gaz protecteur sont également considérés.
- Les propriétés de la poudre : Il s'agit de la taille moyenne des particules, de la répartition granulométrique, de la morphologie, des propriétés thermo-physiques et optiques et de la contamination éventuelle en impuretés de la poudre.
- Les caractéristiques du substrat : Elles se rapportent aux dimensions, à la composition chimique, à l'état métallurgique, à la rugosité et à la température de préchauffage du substrat.

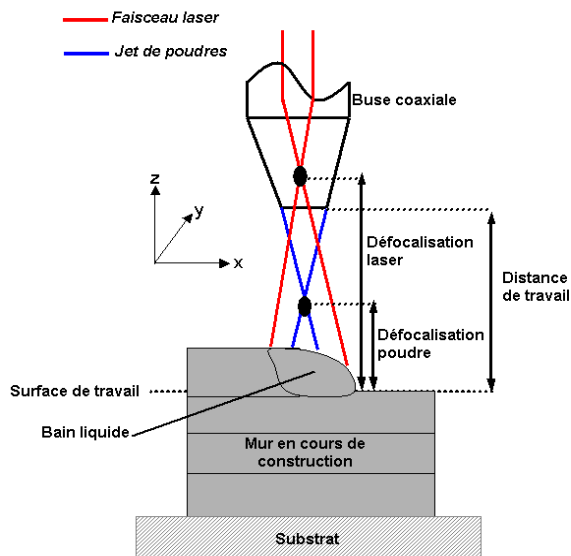


Figure 1. Schéma de principe du procédé de projection laser

Les paramètres de sortie permettent d'évaluer les pièces projetées : ils sont relatifs à leurs caractéristiques géométriques, métallurgiques et mécaniques ainsi qu'à des critères économiques du procédé. Les caractéristiques géométriques concernent aussi bien l'état de surface des pièces (rugosité, oxydation) que la hauteur apparente par couche (H_{app}) définie comme la hauteur totale du mur divisée par le nombre de couches, l'épaisseur apparente par couche (e_{app}), la hauteur de zone refondue (H_{ZR}) de la couche N-1 lors de la projection de la couche N, la hauteur de zone affectée thermiquement (H_{ZAT}) et le volume du bain liquide. Afin de distinguer l'ensemble de ces zones sur les coupes métallographiques des murs, les essais ont été interrompus au milieu de la dernière couche de manière à figer le bain liquide, la ZR et la ZAT. L'étude des propriétés métallurgiques consiste en la détermination de la composition, la fraction volumique et la morphologie des phases engendrées au sein du mur, la taille et la morphologie des grains caractérisant l'anisotropie microstructurale ainsi qu'en l'évaluation de l'éventuelle présence de défauts tels que porosités, fissures, inclusions ou ségrégations chimiques. Les propriétés mécaniques ont été appréciées par des essais de microdureté Vickers et seront évaluées de manière plus approfondie par des essais de traction et de fatigue dans une prochaine étude. Les critères économiques du procédé sont relatifs au temps de fabrication du mur, au rendement massique R_m (quantité de poudre utilisée pour la construction du mur divisée par la quantité de poudre effectivement distribuée au travers de la buse) et la vitesse de construction \dot{H}_{app} (Hauteur totale du mur divisée par son temps de fabrication). Le temps de fabrication correspond au temps de projection additionné du temps mort (arrêt laser à la fin de chaque couche afin d'éviter l'échauffement du matériau aux points de rebroussement). Une précédente étude [1] a permis de déterminer l'influence des paramètres d'entrée du procédé sur les critères économiques ainsi que sur les propriétés géométriques et métallurgiques de pièces projetées en TA6V. Bien que les stratégies de construction soient

essentielles à la réalisation de pièces complexes (notamment la gestion des temps morts), nous avons choisi d'effectuer nos essais sur un mur sans complexité géométrique.

Les échantillons caractérisés lors de cette étude n'ont concerné que le matériau TA6V et ont été projetés avec un laser Nd:YAG Trumpf HD4006 fibré de 4kW opérant entre 200 et 600 Watts. Le faisceau laser est focalisé au moyen d'une lentille focale de 200 mm. La configuration de travail est fixée : la défocalisation laser est de +8 mm pour un diamètre du faisceau laser de 1,75mm au niveau de la surface de travail, la défocalisation poudre est nulle de telle sorte que le point focal poudre d'un diamètre de 1,5mm se trouve sur la surface de travail et que la distance de travail soit de 5 mm. Le substrat est placé sur une table XY dont la vitesse de déplacement varie de 100 à 800 mm.min⁻¹. Les débits massiques de poudre utilisés peuvent varier de 1 à 9 g.min⁻¹, correspondant à des débits volumiques de 0,23 à 2 cm³.min⁻¹.

Les mesures de températures lors de la construction des murs sont réalisées au moyen d'un pyromètre laser Infrarouge IMPAC de type IGA120MB18 dont la plage de température s'étend de 350°C à 1800°C.

Les propriétés de l'alliage de titane TA6V projeté dans le cadre de cette étude sont répertoriées dans le tableau 1.

Propriétés	valeur
Masse volumique ρ (g.cm ⁻³)	4,4
Température de fusion T_f (°C)	1660
Chaleur latente de fusion ΔH_f (J.g ⁻¹)	365 ^(*)
Chaleur spécifique à l'état solide C_{ps} (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	610
Chaleur spécifique à l'état liquide C_{pl} (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	986
Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	5,8
Diffusivité thermique $K = \lambda/\rho.C_{ps}$ (m ² .s ⁻¹)	2,15.10 ⁻⁶
Emissivité spectrale ε ($\lambda = 1,45 - 1,8\mu\text{m}$) d'un mur en TA6V	
à T_{amb}	0,91
à $T = 600^\circ\text{C}$	0,72
à $T = 1100^\circ\text{C}$	0,77
à $T = 2400^\circ\text{C}$	0,9 ^(**)
Emissivité spectrale ε du TA6V pour la longueur d'onde du laser Nd :YAG ($\lambda = 1.06\mu\text{m}$) à T_{amb}	0.55

Tableau 1. Propriétés thermophysiques du TA6V

(*) A défaut, il s'agit de la valeur du titane pur.

(**) valeur extrapolée sachant que l'émissivité du liquide est plus importante que celle du solide.

Résultats

Interaction laser-matière

L'interaction laser-poudre joue un rôle relativement important dans le rendement énergétique du procédé (figure 2). Une partie de la puissance fournie P_f par le laser va être absorbée par la poudre P_{abs} , une autre partie va être réfléchiée par le milieu poudre P_{rp} et enfin une grande part de cette puissance va être transmise au niveau du mur P_{trans} . Une partie de cette puissance transmise va être réfléchiée P_{rm} par le matériau massif (substrat et mur) et la partie restante P_{utile} va être dissipée par conduction, convection et rayonnement pour maintenir un bain liquide d'un certain volume à une température moyenne T_{moy} et créer une ZR (garante d'une bonne adhésion entre couches) et une ZAT sur quelques couches du mur :

$$P_{utile} = P_f - (P_{abs} + P_{rp} + P_{rm}) \quad (1)$$

$$P_{trans} = P_{utile} + P_{rm} \quad (2)$$

O.O.Diniz Neto et R.Vilar [2] ont évalué l'atténuation de la puissance fournie par le laser à environ 10% (pour des poudres de stellite de diamètre 40 μm). Cette atténuation (a) concerne la puissance absorbée par les poudres P_{abs} ainsi que la puissance réfléchiée par les poudres P_{rp} :

$$a = \frac{P_{abs} + P_{rp}}{P_f} = 10\% \quad (3)$$

$$\frac{P_{trans}}{P_f} = 1 - a \quad (4)$$

La réflectivité R est définie comme étant égale à 1 moins l'absorbance A d'un matériau massif :

$$A_{massif} + R_{massif} = 1 \quad (5)$$

Ainsi, si l'on considère la puissance totale dissipée par les poudres P_{dp} , il est possible d'écrire :

$$\frac{P_{abs}}{P_{dp}} + \frac{P_{rp}}{P_{dp}} = A_{poudre} + R_{poudre} = 1 \quad (6)$$

La réflectivité est élevée lorsqu'il s'agit d'une surface métallique solide, massive et dépourvue de toute contamination [3] et dépend de la longueur d'onde du faisceau incident [4,5]. Cependant, pour des particules de poudre considérées comme réactives, la présence fréquente d'un fin film d'oxyde à leur surface augmente l'absorbance du matériau et diminue donc sa réflectivité. De plus, la réflectivité d'un matériau est plus basse si il se trouve à l'état liquide. Or, les poudres sont susceptibles de fondre lors de l'interaction laser-poudre. En outre, pour un milieu dispersé tel qu'un nuage de poudres, des réflexions multiples du faisceau laser peuvent s'y produire en nombre d'autant plus grand que la poudre est fine et en concentration importante. Ainsi, une particule de poudre peut interagir plusieurs fois avec le faisceau laser. Ceci concourt à augmenter la puissance absorbée par les particules de poudre et donc à diminuer les pertes d'énergie par réflexion du faisceau. Cependant, lors de l'utilisation de faibles débits massiques, ce qui est le cas dans notre étude, le milieu de poudre est dilué et les réflexions multiples peuvent être considérées comme négligeables [6].

Une partie P_{fusion} de la puissance absorbée par la poudre va être utilisée pour la porter de la température ambiante T_{amb} à une température supérieure ou égale à T_f et l'autre part va être dissipée via le rayonnement et la convection (P_{pertes}) :

$$P_{abs} = P_{fusion} + P_{pertes} \quad (7)$$

$$\text{avec } P_{fusion} = P(T_{amb} \rightarrow T_f) + P(T_f \rightarrow T_{moy}) \quad (8)$$

En supposant que la poudre soit portée à la température T_f , la quantité d'énergie nécessaire pour fondre un gramme de poudre est définie comme suit :

$$Q_{fusion} = Cps \cdot (T_f - T_{amb}) + \Delta H_f \quad (9)$$

A défaut de connaître la proportion de poudre qui atteint le palier de solidification, on suppose que l'ensemble des poudres projetées sont concernées par la fusion.

Il est alors possible de déterminer la puissance nécessaire à la fusion des poudres P_{fusion} :

$$P_{fusion} = \frac{Q_{fusion} \cdot Dm}{60} \quad (10)$$

A partir des données thermiques du TA6V (Tableau 1), Q_{fusion} et P_{fusion} ont pu être calculées :

$$Q_{fusion} = 1365 \text{ J/g}$$

$$P_{fusion} = P(T_{amb} \rightarrow T_f) = 22,7 \text{ W pour } Dm = 1 \text{ g/min}$$

Cette puissance de fusion représente 7,6% de la puissance fournie par le laser de 300 Watts, ce qui est inférieur à l'atténuation de 10%. Ceci signifie qu'il est fort probable que les poudres soient fondues avant d'atteindre le bain liquide pour la puissance laser considérée. Cependant, la température des poudres peut décroître lors de leur parcours entre la sortie de la buse et le bain liquide du fait des pertes par convection et rayonnement (P_{pertes}). Les 2,4% restant concernent la puissance P_{rp} réfléchiée par les poudres et celle dissipée par convection et rayonnement P_{pertes} . Dans le cas où les poudres peuvent être portées au delà de la température de fusion et en particulier à une température T_{moy} de 2400°C, une puissance supplémentaire $P(T_f \rightarrow T_{moy})$ dissipée par les poudres doit être considérée :

$$P(T_f \rightarrow T_{moy}) = Cp_L (T_{moy} - T_f) \frac{Dm}{60} = 12,2 \text{ W} \quad (11)$$

Si l'on ajoute ces deux puissances $P(T_{amb} \rightarrow T_f)$ et $P(T_f \rightarrow T_{moy})$, la somme représente 11,6% de la puissance fournie par le laser alors que les pertes thermiques et celles par réflexion ne sont pas considérées, ce qui n'est pas réaliste puisque l'atténuation est de 10%. Une première solution consisterait à pondérer par le rendement massique Rm (égal à 0,80 pour les paramètres laser considérés) la puissance dissipée par la poudre pour élever sa température de T_{amb} à T_{moy} . Ce calcul reste inadéquat dans la mesure où pour satisfaire à l'équation (3), il est considéré que le reste de la poudre ne s'échauffe pas, ce qui est fort improbable.

Quoi qu'il en soit, il convient de comparer le temps de vol des particules (temps de parcours des particules de poudre entre la sortie de la buse et le bain fondu c'est-à-dire le temps d'interaction laser-poudre) avec le temps de thermalisation des particules (temps de mise à l'équilibre thermodynamique des particules) afin de s'assurer que la température de la particule soit homogène du cœur à sa surface.

Le temps de thermalisation des particules t_t est fonction du rayon de la particule r et de sa diffusivité thermique K [6] :

$$t_t = \frac{r^2}{6K} \quad (12)$$

Pour la poudre de TA6V utilisée, le rayon moyen des particules est de $30\text{ }\mu\text{m}$ et la diffusivité thermique s'élève à $2,15 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, ce qui donne un temps de thermalisation de $0,07\text{ ms}$. Cependant, la poudre utilisée possède une granulométrie s'étalant majoritairement de $45\text{ à }75\text{ }\mu\text{m}$. Il est possible de déterminer le temps de thermalisation pour chaque particule (figure 3) et d'en déduire un rayon critique de particule à partir duquel les particules de poudre n'ont pas le temps de fondre totalement compte-tenu du fait que le temps de thermalisation est supérieur au temps de vol des particules. Dans ce cas précis, seule une fraction massique de la poudre sera fondue en arrivant dans le bain liquide. Le temps de vol des particules n'a pas pu encore être déterminé pour notre montage expérimental mais d'après des montages équivalents, il semble que celui-ci soit de l'ordre de la milliseconde [6] et donc supérieur au temps de thermalisation des particules.

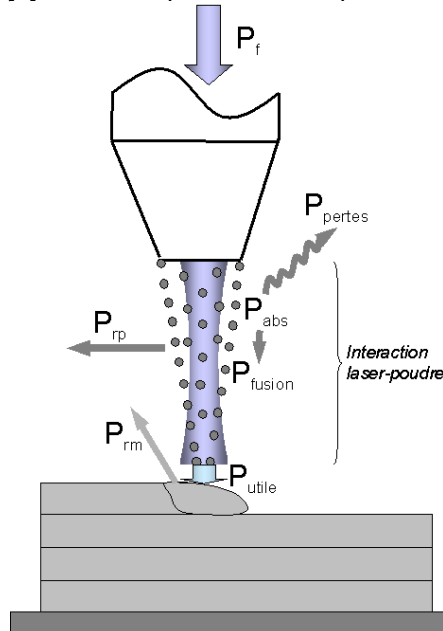


Figure 2. Schéma de principe de l'interaction laser-poudre

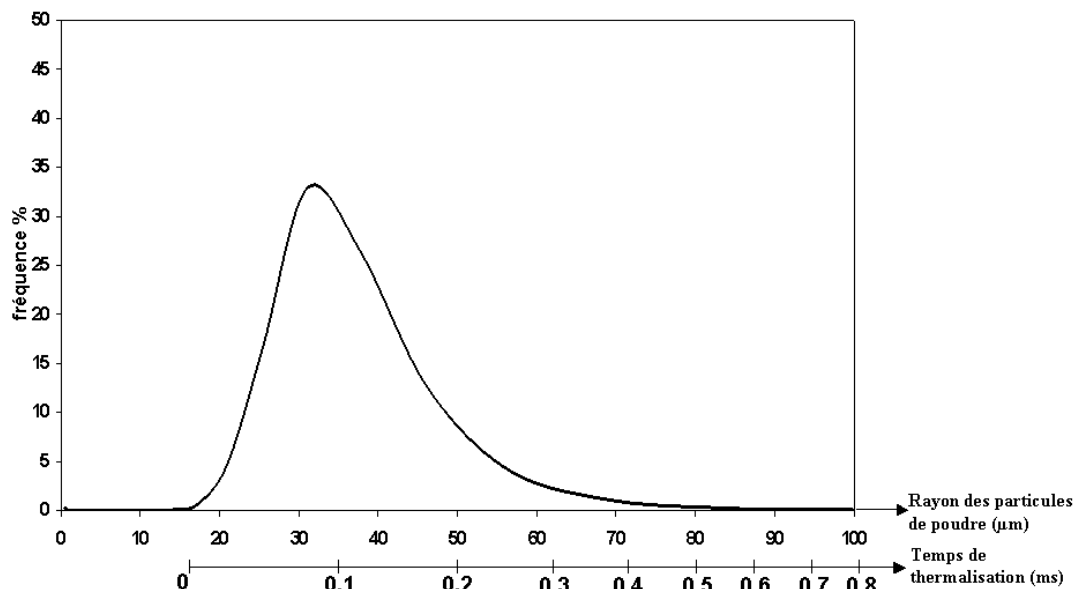


Figure 3. Diagramme de répartition granulométrique de la poudre TA6V gradué en fonction du rayon des particules et du temps de thermalisation

Instrumentation du procédé

Une instrumentation du procédé a été menée au moyen d'un pyromètre laser infrarouge visant une des couches du mur lors de sa construction. Le relevé de température effectué sur une couche d'un mur constitué de soixante couches (figure 4) témoigne de l'histoire thermique subie par cette couche : chaque pic de température représente la réponse du pyromètre à chaque fois que le laser passe au-dessus du point de visée. Le pyromètre relève également la température avant la fabrication de la couche visée et est de ce fait sensible à l'élévation de température du milieu environnant (Hélium et/ou Hélium+poudres). La couche considérée est soumise à un recuit cyclique parfaitement anisotherme (aucun maintien en température) : sa

température oscille entre une température maximale, notée température pic T_{pic} , et une température minimale encore appelée température de recuit T_o [7]. Au cours de la construction du mur, la température pic de la couche considérée va décroître rapidement au fur et à mesure que les couches se succèdent jusqu'à atteindre la température de recuit T_o au bout d'un certain nombre de couches, soulignant l'absence de cyclages thermiques à partir d'une certaine distance. La température de recuit va quant à elle augmenter progressivement puis se stabiliser rapidement à une valeur dépendante de la couche examinée avant de chuter (figure 5). Aussi, cette température de recuit d'une couche donnée n'est constante que pour des murs de faibles hauteurs (≤ 30 couches).

Si l'on compare les relevés de température effectués sur la cinquième, trentième et cinquantième couche d'un mur de soixante couches (figure 4), il apparaît tout d'abord que les températures pic augmentent avec le nombre de couches déposées : la température maximale atteinte par la cinquantième couche est supérieure à celle atteinte par la cinquième couche. De plus, la température de recuit atteinte par la 5^{ème}, 15^{ème}, 30^{ème} et 50^{ème} couche est d'autant plus importante que la couche concernée se trouve éloignée du substrat (figure 5). Un gradient thermique s'établit donc dans le mur au fur et à mesure de sa construction (figure 6), preuve que l'évacuation des calories s'effectue en grande partie par conduction via le substrat. Bien que ce fait expérimental ait été confirmé à maintes reprises, on supposera par simplification qu'au cours d'une fabrication d'un mur à N couches, la température de recuit est constante du bas du mur jusqu'à la zone affectée thermiquement proche du bain liquide.

La mesure de la pente (dT/dt) au sommet du pic de la couche visée par le pyromètre permet d'en déduire sa vitesse de montée en température et sa vitesse de tremp : elles sont respectivement de 2500 et $1000^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ en moyenne. On note également que la vitesse de tremp décroît lorsque la couche visée s'éloigne du substrat : la cinquantième couche possède une vitesse de tremp de $900^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est plus faible que celle de la cinquième couche ($1080^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$). Ceci met de nouveau en évidence le pouvoir dissipateur de calories du substrat qui est d'autant moins marqué que la couche est éloignée de celui-ci. En outre, pour une couche donnée, les vitesses de refroidissement relatives aux cycles successifs de recuit, vont également décroître au fur et à mesure que les couches se succèdent. Ainsi lors du dépôt de la quinzième couche, la vitesse de refroidissement au pied du pic de la cinquième couche est de l'ordre de $30^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$.

Les températures indiquées par le pyromètre restent faibles bien que celui-ci ait été étalonné. En effet, nous relevons deux indices sur les courbes de mesure de la température d'une couche : d'une part une température pic atteinte par le bain liquide d'environ 1400°C alors que la température de fusion du TA 6V est de 1660°C et d'autre part une rupture de pente lors du refroidissement en température de la couche située vers 700°C environ et correspondant au transus β situé à 980°C pour le TA6V après un refroidissement à l'équilibre. Ce décalage des températures s'explique en partie par la taille importante de la tache d'analyse du pyromètre (plus d'1 mm pour nos conditions opératoires) supérieure à la taille du bain liquide. Aussi, le pyromètre dont on dispose ne permet d'accéder qu'à une température moyennée sur quelques couches. Des essais complémentaires de mesure de température seront réalisés pour mieux cerner l'origine de ce phénomène, notamment en choisissant des paramètres laser permettant d'obtenir un volume du bain liquide supérieur à la tache du pyromètre (forte puissance P, fort débit massique Dm et faible vitesse de balayage V).

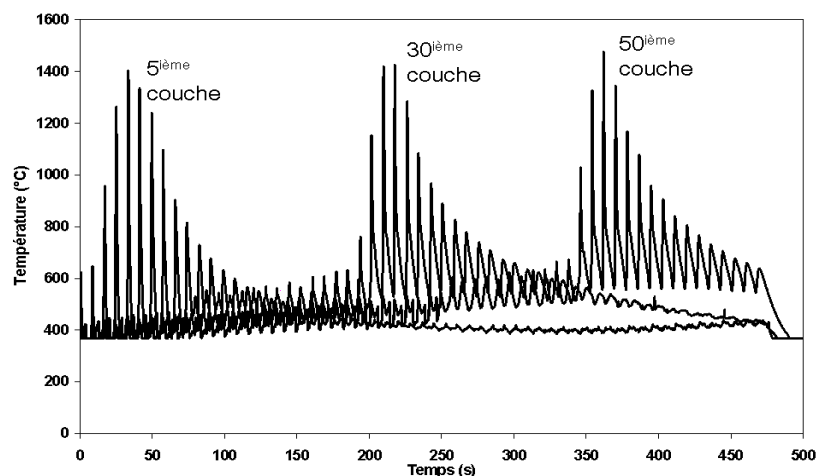


Figure 4. Relevés de température effectués au moyen d'un pyromètre laser sur la cinquième, trentième et cinquantième couche d'un mur de soixante couches

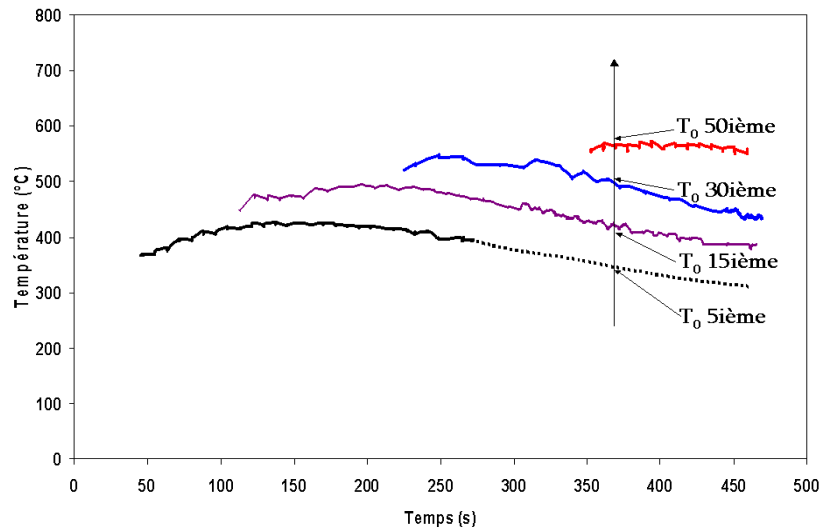


Figure 5. Evolution de la température de recuit T_0 de la cinquième, quinzième, trentième et cinquantième couche d'un mur de soixante couches avec l'éloignement par rapport au substrat

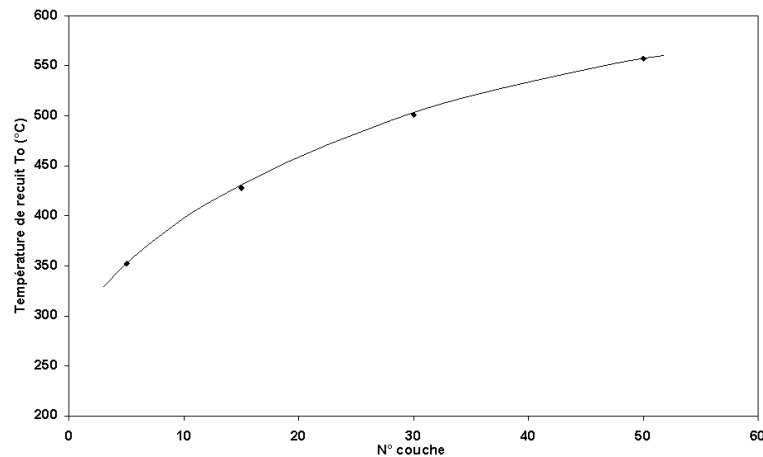


Figure 6. Evolution de la température de recuit en fonction du numéro de la couche, soit du bas vers le haut du mur en construction

Indices métallurgiques

Ces conditions de refroidissement rapide suivies de recuits successifs sont à l'origine de microstructures variées du TA6V. En effet, des cartographies de microstructure et d'anisotropie ont pu être établies en variant les paramètres prépondérants P , V et D_m [1]. Le TA6V projeté en l'absence de contrôle procédé présente une microstructure $\alpha+\beta$ de morphologie lamellaire dont la finesse et la proportion des phases varient fortement selon les paramètres P , V , D_m choisis [1,8]. Une telle diversité de microstructures témoigne d'une variété de vitesses de refroidissement et de températures de recuit atteintes. Lors de la fabrication du mur, la couche après trempe peut soit présenter une microstructure aiguillée α' laquelle évolue vers une microstructure fine $\alpha+\beta$ sous l'influence des recuits successifs, soit présenter sous l'effet d'une vitesse de trempe moins énergétique une microstructure grossière $\alpha+\beta$ qui va s'enrichir en phase α lors des recuits successifs. Pour certaines conditions, il est même observé un gradient de dureté du bas vers le haut du mur traduisant un gradient de fraction volumique de phases α et β engendré par l'établissement d'un gradient thermique au sein du mur et donc de conditions de refroidissement et de recuits différentes selon la hauteur du mur. De plus, il est observé des domaines de paramétrie présentant des grains colonnaires orientés dans le sens du gradient thermique et d'autres domaines où les grains sont équiaxes.

La figure 7 présente une micrographie optique de la moitié d'un mur de cinquante couches obtenu pour des conditions de paramétrie standard. De petits grains équiaxes sont observés à la base et aux bords du mur alors que les grains sont colonnaires dans le reste du mur, traversant plusieurs couches et orientés selon le gradient thermique. Le mur présente une microstructure $\alpha+\beta$ de Widmanstätten : la phase hexagonale compacte α aciculaire est entourée d'un liseré de phase cubique centré β (figure 8). Une large zone claire

est distinguée au sommet du mur. Une série de bandes blanches horizontales sont présentes sur toute la hauteur du mur excepté dans la zone claire. Un grossissement des lamelles α de la structure $\alpha+\beta$ est parfois observé dans ces bandes blanches pour certaines paramétries [8,9]. Comme la dernière couche a été interrompue au milieu du mur, le volume et la forme du bain fondu peuvent être estimés ainsi que le nombre de couches contenues dans la zone claire et le nombre de couches contenues dans la zone refondue ZR (figure 9). La zone claire, assimilée à une zone affectée par la température, concerne huit couches et l'avant dernière couche est entièrement refondue lors de la projection de la dernière couche. Le volume du bain est estimé à environ $1,7\text{mm}^3$ à partir d'images MEB des surfaces latérales et supérieures du bain liquide.

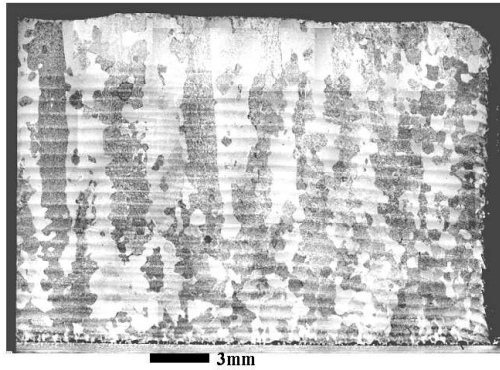


Figure 7. Micrographie optique de la section XZ polie et attaquée d'un mur de cinquante couches construit avec une paramétrie standard optimisée.

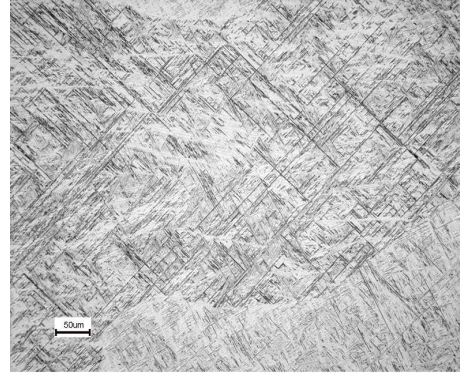


Figure 8. Micrographie optique de la section XZ polie et attaquée d'un mur de cinquante couches construit avec une paramétrie standard optimisée : zoom montrant la microstructure fine de Widmanstätten $\alpha+\beta$ du TA6V.

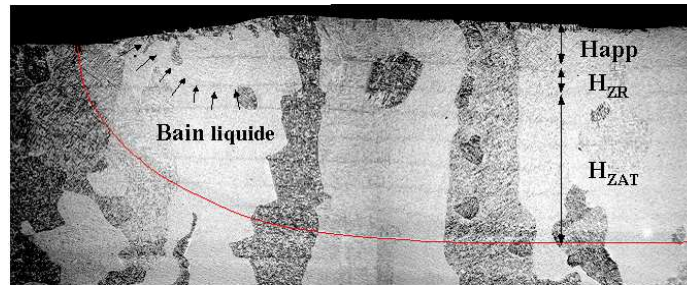


Figure 9. Micrographie optique de la section XZ polie et attaquée d'un mur de cinquante couches construit avec une paramétrie standard optimisée : zoom de la zone claire au sommet du mur montrant les huit dernières couches déposées ainsi que le bain liquide ($H_{ZAT} = 6 H_{app}$ et $H_{ZR} = H_{app}$)

Discussion

Lors de la projection laser, le refroidissement du mur intervient d'une part par conduction via le substrat, d'autre part par convection via le milieu environnant (convection forcée par le flux de gaz protecteur) et enfin par radiation de la surface du mur. Pour des conditions de paramétrie standard, le mur de cinquante couches présente une microstructure fine $\alpha+\beta$ de Widmanstätten et des grains colonnaires indiquant que le ratio d'énergie dissipée par conduction est vraisemblablement majoritaire. La puissance utile P_{utile} délivrée par le laser va être utilisée d'une part pour entretenir le bain fondu et d'autre part pour créer une zone refondue (ZR) suffisamment importante pour assurer une liaison métallurgique entre deux couches. Le reste de l'énergie va être dissipé d'une part dans le matériau et ainsi créer une zone affectée thermiquement (ZAT) et d'autre part vers le milieu extérieur par convection et rayonnement. Les bandes blanches observées au sein du mur sont en réalité les traces des ZAT successives. Pour les paramètres standard considérés, la ZR concerne une couche et la ZAT six couches.

A partir de ces considérations métallurgiques, il est possible d'établir un bilan thermique en conduction du procédé de projection (figure 10). La puissance nécessaire pour la construction du mur P_{constr} est la somme de la puissance absorbée par les poudres P_{abs} pondérée par le rendement massique Rm et de la puissance utile P_{utile} . La réflectivité du TA6V massif non oxydé à l'ambiante pour la longueur d'onde du laser Nd :YAG étant de l'ordre de 45% [10], la puissance P_{utile} ne représente alors que 55% de la puissance transmise. La puissance utilisée pour la construction vaut donc :

$$P_{constr} = Rm \cdot P_{abs} + P_{utile} = [Rm \cdot A_{poudre} \cdot a + A_{massif} \cdot (1-a)] \cdot P_f$$

$$= 0.076 \cdot Rm \cdot P_f + 0.55 P_{trans} = (0.076 \cdot 0.8 + 0.55 \cdot 0.9) P_f = 0.56 P_f$$

Le rendement énergétique η du procédé est donc de 56%. On suppose que la température de recuit T_0 est constante des couches 1 à N-8 du mur de 50 couches, bien qu'il ait été démontré le contraire au regard de la figure 6. De plus, on considère que les particules de poudre arrivent à T_f dans le bain liquide sans qu'elles aient pu refroidir ($P_{pertes} = 0$) et que cette quantité de matière fondue s'élève par conduction à la même température que le bain notée T_{moy} . Les différentes contributions énergétiques sont calculées à partir de l'équation de la chaleur. Les températures variables du problème sont au nombre de trois : T_0 , la température de recuit, T_{zat} , la température atteinte par la ZAT, et T_{moy} , la température moyenne atteinte dans le bain liquide (moyenne entre sa température pic et la température de fusion). Il apparaît préférable de raisonner à partir de paramètres adimensionnels pour simplifier la mise en équation du problème :

$$\alpha = \frac{T_0}{T_f} \quad \text{avec} \quad \frac{T_{amb}}{T_f} \leq \alpha \leq 1$$

$$\beta = \frac{T_0}{T_{zat}} \quad \text{avec} \quad \alpha \leq \beta \leq 1$$

$$\gamma = \frac{T_{moy}}{T_f} \quad \text{avec} \quad 1 \leq \gamma \leq 2$$

Ainsi, les diverses contributions énergétiques linéiques sont :

- $El_1 + El_2$: énergies linéiques pour porter la masse de poudre déposée de T_{amb} à T_f et la zone refondue de T_0 à T_f :

$$El_1 + El_2 = A \cdot Cps \cdot \left(2 - \frac{T_{amb}}{T_f} - \alpha\right)$$

- El_3 : énergie linéique pour porter la ZAT de T_0 à T_{zat} :

$$El_3 = 6 \cdot A \cdot Cps \cdot \alpha \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)$$

- $El_4 + El_5$: énergie linéique pour fondre au palier de solidification la masse de poudre déposée et la zone refondue :

$$El_4 + El_5 = A \cdot 2 \cdot \left(\frac{\Delta H_f}{T_f}\right)$$

- El_6 : énergie linéique pour porter le volume de liquide de T_f à T_{moy} :

$$El_6 = A \cdot 2 \cdot Cp_L \cdot (\gamma - 1)$$

avec : $A = \rho \cdot e_{app} \cdot H_{app} \cdot T_f$

$$H_{ZAT} = 6 \cdot H_{app}$$

$$H_{ZR} = H_{app}$$

Les différentes contributions des énergies linéiques peuvent être représentées graphiquement en fonction des paramètres adimensionnels (figure 11).

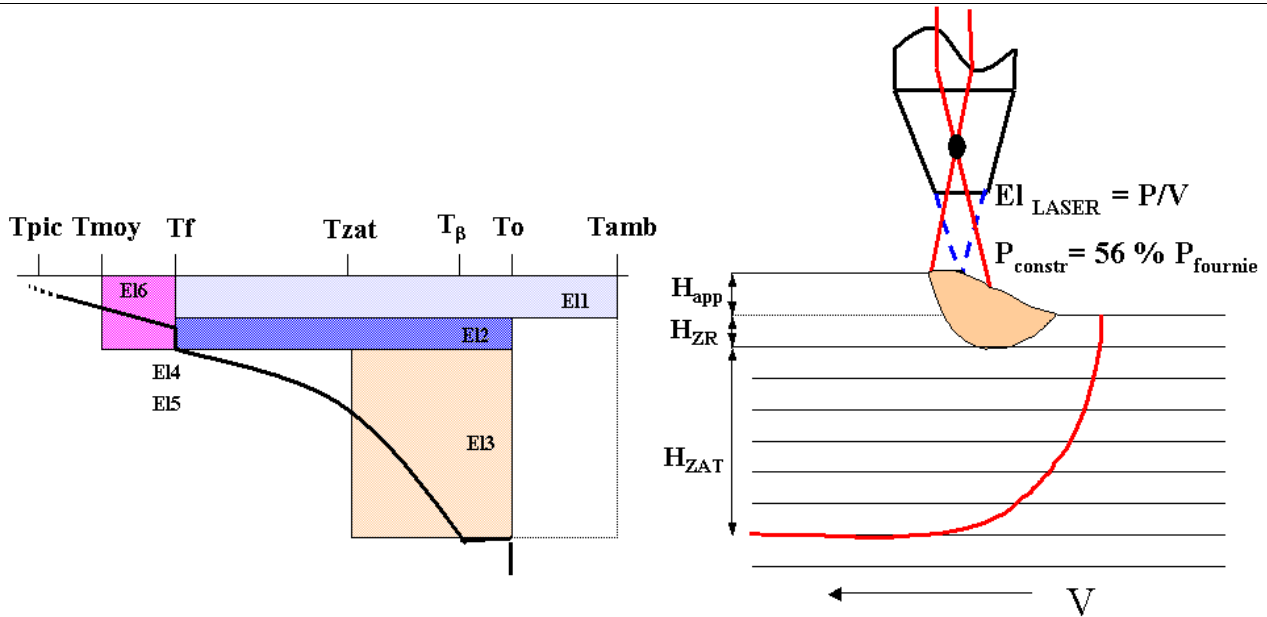


Figure 10. Schéma de principe du bilan thermique en conduction du procédé de projection laser.

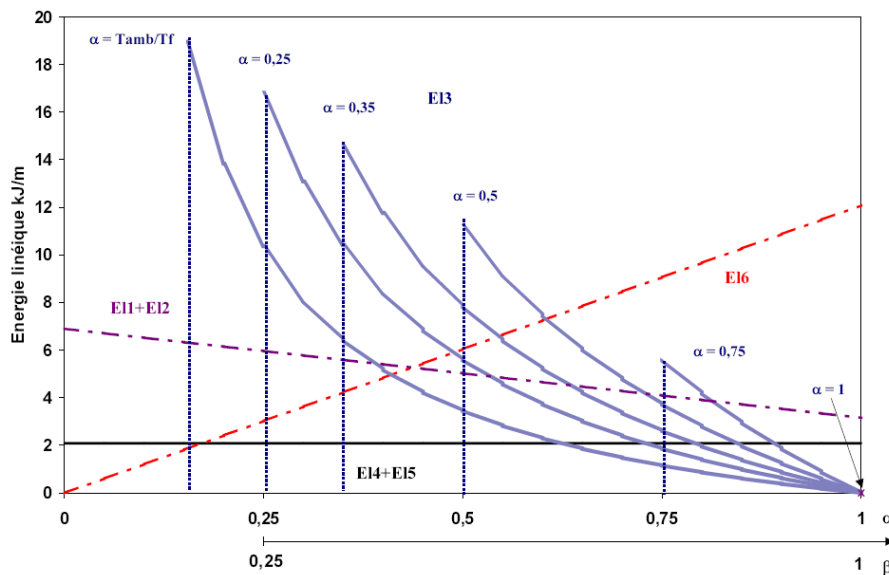


Figure 11. Représentation graphique des diverses contributions énergétiques linéiques en fonction des paramètres adimensionnels α , β et γ .

Un cas « moyennes températures » proche de la réalité a été considéré. Les paramètres laser standard utilisés ($P_f / V = 60 \text{ kJ.m}^{-1}$, $D_m = 1 \text{ g.min}^{-1}$) permettent de réaliser une hauteur apparente par couche H_{app} de $360 \mu\text{m}$ et une épaisseur apparente e_{app} de 2 mm . Les données thermophysiques du TA6V présentées dans le tableau 1 sont utilisées pour l'application numérique. Nous avons choisi une température de recuit $T_0 = 600^\circ\text{C}$ en accord avec les mesures faites par pyrométrie laser, une température de ZAT proche du transus de l'alliage $T_{zat} = 1100^\circ\text{C}$ et une température moyenne du bain liquide $T_{moy} = 2400^\circ\text{C}$ correspondant à la température du bain déterminée par la modélisation d'Arnaud Longuet [11] du Centre des Matériaux (i.e. $\alpha = 0, 45$, $\beta = 0, 63$ et $\gamma = 1, 38$). L'énergie linéique totale ($\sum E_i$) dissipée par conduction est de $17,7 \text{ kJ.m}^{-1}$ comparée à l'énergie linéique de construction $E_{constr} = \eta \cdot (P_f/V) = 0,56 \cdot 60 = 33,6 \text{ kJ.m}^{-1}$. Le ratio de puissance dissipée par conduction est donc de 53%. La part de puissance dissipée par rayonnement (P_{ray}/P_{constr}) est de 5%. Cette puissance rayonnante P_{ray} est calculée à partir de la formule de Stefan-Boltzmann :

$$P_{ray}(W) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{moy}^4 - T_{amb}^4) \cdot S$$

où P_{ray} est la puissance rayonnante, ε est l'émissivité spectrale (proche IR : $\lambda = 1,45 - 1,8 \mu\text{m}$) du mur en TA6V, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) et S la surface rayonnante (surface du bain liquide et une partie de la ZAT = 15 mm^2).

Les calories évacuées par convection via le gaz de protection, déduites du calcul des calories dissipées par conduction et par rayonnement, représentent 42% de l'énergie totale.

Ce calcul permet d'approcher le bilan thermique du procédé de projection laser, cependant des améliorations doivent être encore apportées :

- Les pertes énergétiques des poudres lors de leur trajet de la buse au substrat ont été considérées comme négligeables. La connaissance de l'absorptivité des poudres A_{poudre} de TA6V permettrait de déterminer avec plus de précision la partie de l'énergie dissipée P_{dp} par la poudre qui est absorbée par les poudres P_{abs} et ainsi d'en déduire les pertes énergétiques $P_{\text{pertes}} (=P_{\text{abs}}-P_{\text{fusion}})$ et la partie réfléchiée par la poudre $P_{\text{rp}} (=P_{\text{dp}}-P_{\text{abs}})$.
- L'absorptivité du mur A_{massif} considérée pour le calcul du rendement énergétique du procédé est celle du TA6V massif non oxydé pour la longueur d'onde du laser Nd:YAG à T_{amb} . Or le mur est à la température de recuit T_0 à chaque passe du laser et est légèrement oxydé en surface. Il faudrait donc considérer l'absorbance du mur à la température T_0 mais cette valeur reste jusqu'alors introuvable dans la littérature.
- Pour le calcul de la puissance de fusion P_{fusion} , nous avons considéré que l'ensemble des poudres étaient portées à leur température de fusion avant leur arrivée dans le bain liquide. Il apparaît qu'une meilleure description de l'interaction laser-poudre passerait par la connaissance de la température des poudres de la sortie de la buse au bain liquide. Pour cela, il est nécessaire de résoudre l'équation de mouvement des particules ainsi que l'équation de l'évolution de la température des particules de poudre [12].

Conclusion

Le procédé de projection laser met en jeu un ensemble de phénomènes thermiques complexes qui est à l'origine de propriétés spécifiques du matériau projeté. En effet, les couches subissent une trempe énergétique suite à leur dépôt puis des recuits cycliques et anisothermes avec des vitesses de trempe et de refroidissement ainsi que des températures pic et de recuit fortement dépendantes des paramètres d'entrée du procédé. Aussi les murs projetés en TA6V présentent une variété de microstructures tant du point de vue de la finesse que de la fraction volumique des phases α et β et de la taille des grains.

Le rendement énergétique du procédé a été estimé à 56% et un bilan thermique a été établi à partir des données fournies par l'étude métallurgique. Ce bilan thermique a permis de calculer les ratios énergétiques dissipés par conduction et par rayonnement et d'en déduire le ratio d'énergie évacuée par convection forcée. Pour des conditions opératoires standard optimisées, ce bilan révèle que la part d'énergie dissipée par conduction est majoritaire, ce qui explique la croissance colonnaire des grains dans la direction du gradient thermique. Le bilan thermique du procédé a pu être seulement approché du fait notamment de la méconnaissance de l'absorbance des poudres et du mur en construction. Des améliorations pourront être apportées à ce calcul par la suite.

References:

- [1] J.Maisonneuve, C.Colin, Y.Bienvenu, P.Aubry; *Direct manufacturing of aeronautical components by laser metal deposition of Ti-6Al-4V; paper 1203, ICALEO®2006 Congress Proceedings, Phoenix, USA, 2006.*
- [2] O.O.Diniz Neto, R.Vilar, *Physical-computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing; Journal of Laser Applications, Vol 14, N°1, pp46-51, 2002.*
- [3] M.C.Sahour, A.B.Vannes, J.M.Pelletier; *Laser cladding by powder injection: optimization of the processing parameters, J.Phys.IV, Vol.1, C7-51, 1991.*
- [4] P.Fischer and al, *Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source, Acta Materialia 51, pp 1651-1662, 2003.*
- [5] A.Yakovlev and al, *Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects, Surface and Coatings Technology 190, pp 15-24, 2005.*
- [6] J.M.Pelletier, P.Sallamand, *Injection coaxiale de poudres sous faisceau laser pour la réalisation de revêtements: problèmes physiques associés; J.Phys.III; N°5, pp313-331, 1995.*
- [7] M.L.Griffith and al, *Understanding thermal behavior in the LENS process, Materials and Design 20, pp 107-113, 1999.*
- [8] X.Wu, J.Liang, J.Mei, C.Mitchell, P.S.Goodwin, W.Voice; *Microstructure of laser-deposited Ti-6Al-4V; Materials and design; Vol.25, N°2, pp 137-144, 2004.*
- [9] S.M.Kelly, S.L.Kampe; *Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: part I. Microstructural Characterization; Metallurgical and Materials Transactions A, Vol35A, N°6, (2004), 1861-1867.*

-
- [10] *A.Goldsmith, T.E.Waterman, H.J.Hirschhorn ; Handbook of Thermophysical properties of Solid Materials, Armour Research Foundation ; The Macmillan Company NY, 1961.*
- [11] *A.Longuet, C.Colin, P.Peyre, S.Quilici, G.Cailletaud ; Modélisation de la fabrication de pièces par projection laser : application au Ti-6Al-4V ; Conférence Matériaux 2006, Dijon, 2006.*
- [12] *A.Yakovlev and al. ; Laser-assisted manufacturing of functionaly graded 3D objects ; Surface and Coatings Technology , Vol.190, pp 15-24, 2005.*